

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.04.017

基于平均相关算法的北斗 B2 信号快速捕获

徐亮¹ 曾庆喜¹ 唐琳琳¹ 曾庆化²

(1. 南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016;

2. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

摘要:以最新公布的北斗 B2 频点卫星导航信号为研究对象, 针对捕获过程中采样点数过多, 计算量大引起的软件接收机捕获速度慢、不易于硬件实现的缺点, 在对传统的并行码相位捕获算法的研究基础上, 根据北斗 B2 信号的特点提出了一种基于改进的平均相关算法的快速捕获方法。该算法通过平均采样将相关运算的点数由 11 428 降至 2 048, 由于平均采样过程中, 叠加的采样点数没有跨越符号位, 因此不会引起信号能量的损耗, 采用了最大峰值和次大峰值的比值 (Peak-to-peak ratio, PPR) 对该算法的捕获性能进行量化分析。利用仿真信号源对算法进行验证, 实验结果表明, 该算法和传统的捕获算法相比, 两者捕获灵敏度基本相同, 但前者的运算量减少了近一半, 而且 2 048 点快速傅里叶变换 (Fast Fourier transform, FFT) 比 11 428 点 FFT 更利于硬件实现, 因此有助于满足软件接收机对实时性的要求。

关键词:北斗 B2 信号; 平均相关; 快速捕获; 最大峰值和次大峰值比

中图分类号: TN927.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2015)04-0588-07

Fast Acquisition for Beidou B2 Signal Based on Averaging Correlation

Xu Liang¹, Zeng Qingxi¹, Tang Linlin¹, Zeng Qinghua²

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The large number of sampling point for Beidou B2 satellite navigation signal causes heavy calculation cost in acquisition, which will result in slow acquisition speed and difficult hardware implementation. A fast acquisition algorithm based on the modified averaging correlation method and the traditional parallel code phase acquisition method is proposed. The suggested algorithm reduces the sampling number from 11 428 to 2 048 by averaging sampling and during which the samples grouped together do not cross sign bit, therefore, the signal energy loss is avoided. Simulation experiment based on simulated signal source is conducted and peak-to-peak ratio (PPR) is adopted for quantitative analysis of acquisition performance. Experimental result indicates that the acquisition accuracy of the proposed algorithm is almost the same with the traditional algorithm while it saves nearly half of the amount of calculation. Besides, the hardware implementation of 2 048 fast Fourier transform (FFT) is much easier than 11 428 FFT which is helpful for more real-time of software receiver.

Key words: Beidou B2 signal; averaging correlation; fast acquisition; peak-to-peak ratio (PPR)

北斗卫星导航系统 (Beidou navigation satellite system, BDS) 是中国自主发展, 独立运行的,

基金项目: 国家自然科学基金 (51505221) 资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金 (NS2013016) 资助项目; 南京航空航天大学研究生创新基地 (实验室) 开放基金 (kfj201464) 资助项目。

收稿日期: 2014-05-28; **修订日期:** 2015-03-09

通信作者: 曾庆喜, 男, 讲师, E-mail: jslyzqx@163.com。

与世界其他卫星导航系统兼容共用的全球卫星导航系统。该导航系统可在全球范围内为各类用户提供全天候、高精度的定位、导航、授时服务^[1]。2013 年底,《北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件(2.0 版)》新增了北斗系统 B2 频点的信号内容。北斗二代 B2 频点信号的正式公布标志着北斗系统已经成为世界上首个拥有两个民用频点并已经形成服务能力的卫星导航系统,可以为用户提供高精度双频服务,使定位精度从单频时的 10 m 跃升至米级、甚至分米级^[2-3]。由于北斗 B2 信号的测距码码长是 C/A 码的两倍,如果使用传统的捕获算法进行捕获将无法满软件接收机对捕获实时性的要求,更增加了硬件实现的难度和成本。所以本文以最新公布的北斗 B2 频点的中频信号为对象,对该信号的组成、产生及相关特性等进行了介绍,引入平均相关捕获算法并对其进行改进从而实现了北斗 B2 信号的快速捕获。

1 北斗 B2 频点信号的结构及产生

1.1 北斗 B2 频点信号结构

北斗 B2 信号是由 I、Q 两个支路的“测距码+导航电文”正交调制在载波上构成的,B2 信号的表达式可以表示为^[4-5]

$$S_{B2}(t) = A_{B2I} C_{B2I}^j(t) D_{B2I}^j(t) \cos(2\pi f_{B2} t + \varphi_{B2I}^j) + A_{B2Q} C_{B2Q}^j(t) D_{B2Q}^j(t) \sin(2\pi f_{B2} t + \varphi_{B2Q}^j) \quad (1)$$

式中:上标 j 表示卫星编号;下标中的 I 和 Q 分别代表 I 支路和 Q 支路; A 表示信号幅值; C 表示测距码; D 表示测距码上调制的数据码; f_{B2} 表示 B2 信号的标称载波频率, $f_{B2} = 1\ 207.140$ MHz; φ 表示信号的载波初始相位。

由式(1)可以看出,北斗 B2 频点信号与 GPS 信号的组成及结构非常类似,两者之间的区别如表 1 所示。

表 1 北斗 B2 信号与 GPS L1 信号对比

Tab. 1 Comparison between Beidou B2 and GPS L1 signals

参数	北斗 B2 信号	GPS L1 信号
载波频率/MHz	1 207.140	1 575.42
测距码速率/MHz	2.046	1.023
测距码码长	2 046	1 023
调制方式	QPSK	BPSK
导航电文	D1, D2 两种	只有一种

北斗 B2 信号和 GPS 信号类似,均采用 CDMA 的信号复用方式^[6],但由于 B2 信号的测距码是由两个 11 位的线性移位寄存器生成的,因此其

码速率及码长均为 GPS C/A 码的 2 倍。

此外,如表 1 所示,与 GPS 的 BPSK 的调制方式不同,北斗 B2 频点信号中的“导航电文+测距码”是以 QPSK 的方式调制在载波上的。与 BPSK 调制方式相比,QPSK 具有较高的频谱利用率和较好的抗干扰能力。北斗 B2 信号 QPSK 调制方式的原理如图 1 所示^[7-8]。

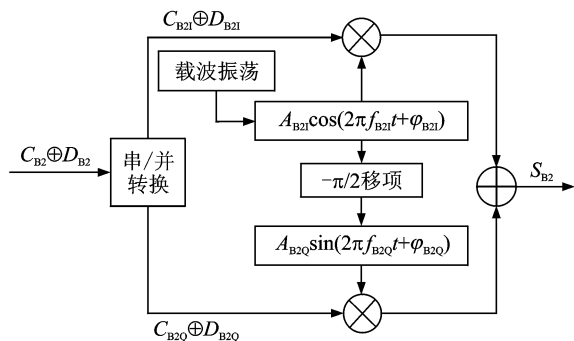


图 1 北斗 B2 频点信号 QPSK 调制原理

Fig. 1 Principle of QPSK demodulation for Beidou B2 signal

1.2 北斗 B2 频点信号的模拟

如图 2 所示是北斗 B2 频点中频信号发生器的原理示意图,根据该图利用 MATLAB 软件仿真模拟了北斗 B2 频点的中频信号源,为接下来完成信号捕获跟踪等算法的开发奠定了基础^[7]。

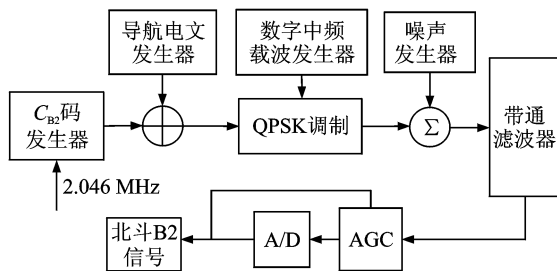


图 2 北斗 B2 频点中频信号发生器原理

Fig. 2 Principle of Beidou B2 intermediate frequency signal generator

在仿真的中频信号源中,卫星为北斗 1 号 GEO 卫星,设置的信号最小接收功率为 -163 dBW,载噪比为 45 dB/Hz,载波中频为 3 MHz,采样频率为 11.428 MHz(80 MHz 信号的 7 分频),信号长度为 1 ms。仿真的 B2 中频输入信号的时域波形、功率谱密度估计、时域自相关如图 3、4 所示。从图 3 中就可以看出仿真的中频信号的功率谱主要集中在中频频率 3 MHz 附近,频

带宽度约为 4.092 MHz。图 4 显示了 QPSK 调制的北斗中频信号的自相关性。

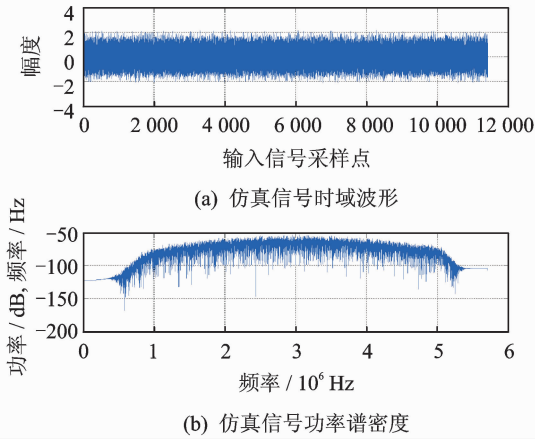


图 3 北斗 B2 中频仿真信号时域波形及功率谱密度
Fig. 3 Beidou B2 intermediate frequency signal and power spectrum density

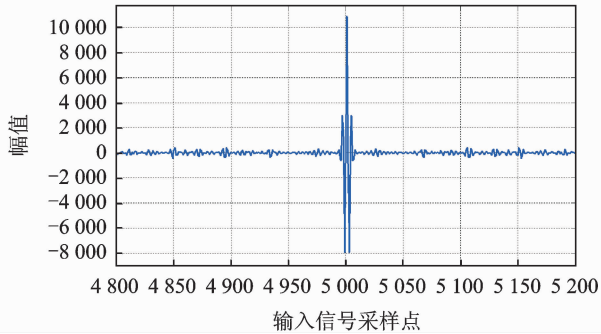


图 4 北斗 B2 中频仿真信号自相关图
Fig. 4 Auto-correlation of Beidou B2 intermediate frequency signal

2 传统的信号捕获算法

由于北斗 B2 频点 Q 支路的信号是授权信号,即不对民用开放,因此本文只对 I 支路的信号进行研究。除去 Q 支路信号后式(1)可以表示为

$$S_{B2I}^i(t) = A_{B2I} C_{B2I}^i(t) D_{B2I}^i(t) \cos(2\pi f_{B2} t + \varphi_{B2I}^i) \quad (2)$$

设天线接收到的北斗 B2I 信号 $S_{B2I}^i(t)$ 被混频到中频并进行采样之后的数字中频信号表示为 y_k

$$y_k = A[C_{B2I}(t_k - t_s) \oplus D_{B2I}(t_k - t_s)] \cdot \cos(\omega_{IF} t_k + \omega_d t_k + \varphi) + v_k \quad (3)$$

式中: t_k 表示采样时刻; t_s 表示测距码 C_{B2I} 的起始时刻; ω_{IF} 和 ω_d 分别表示 B2 载波的中频和载波多普勒频率; v_k 表示高斯白噪声; \oplus 表示“模二相加”运算。

目前广泛采用的信号捕获算法是如图 5 所示的基于快速傅立叶变换(Fast Fourier transform, FFT)的并行码相位搜索捕获算法^[8-9]。

FFT)的并行码相位搜索捕获算法^[8-9]。

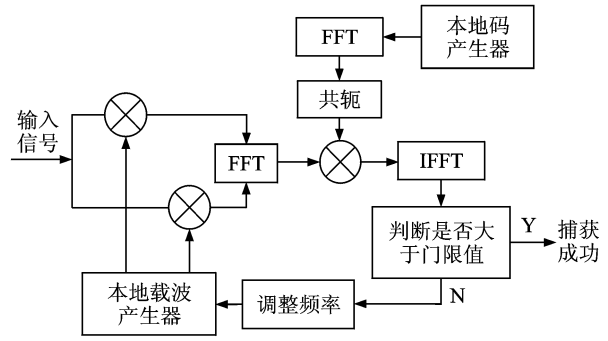


图 5 传统的并行码相位捕获算法
Fig. 5 Traditional parallel code phase acquisition algorithm

并行码相位捕获算法利用快速傅里叶变换将时域的相关运算转换为频域的乘积运算,相对于时域串行搜索捕获算法大大提高了捕获效率^[10-11]。但是对于本文中采样频率为 11.428 MHz 的中频信号,每个 C_{B2I} 码周期(1 ms)就有 11 428 个采样点,11 428 点的 FFT 和快速傅立叶逆变换(Inverse fast Fourier transform, IFFT)计算量大,而且由于 11 428 本身不是 2 的整数次幂,所以不能使用基 2 和基 4 的结构,只能使用混合基结构的 FFT,这样就进一步增加了计算量和硬件实现的复杂度,从而影响了捕获的实时性。

3 基于改进平均相关算法的 B2 信号快速捕获

针对以上大点数 FFT 相关存在的问题,Starzyk 提出了一种基于平均相关的 C/A 码捕获方法,即将每个码片上的采样点叠加为 1 点从而使 5 000 点平均采样至 1 023 个点^[12];之后,Alaqeeli 等为了便于算法在硬件上的实现,对平均相关算法进行了改动,将 5 000 点平均采样至 1 024 个点^[13]。本文针对北斗测距码信号的结构特点,对后者的算法进行了改进,将 11 428 个点下采样至 2 048 个点的同时,最大程度地保证了平均采样后信号的能量。

由于采样频率(11.428 MHz)并非北斗 C_{B2I} 码码率(2.046 MHz)的整数倍,所以当用该采样频率对 C_{B2I} 码进行采样时,每个码片上的采样点数不尽相同,有的是 5 个采样点,有的是 6 个采样点。如果将每个码片上的采样点叠加为 1 个,这样相加的点数就不会跨越符号位,也就不会损失信号能量^[14-16],但是这样得到的采样点数为 2 046 个,依

然不是 2 的整数次幂;如果利用文献[8]中的方法可以直接将 11 428 个点下采样至 2 048 个点,但会使相加的采样点可能即跨过码片也跨过了符号位,从而引起信号能量的损失。本文对以上两种平均采样方法进行了综合并改进,具体方法如下:

(1)首先利用 11.428 MHz 的采样频率对 1 ms 的输入信号和 1 ms 的本地 C_{B21} 码进行采样,分别得到 11 428 个采样点。

(2)找到采样后的 C_{B21} 码的两个最大游程(游程内码片的符号相同),仿真发现,每颗卫星 C_{B21} 码两个最大游程处采样点数为 6 的码片数都不小于 5 个。

(3)在这两个最大游程处,找出每个游程的前 5 个采样点数是 6 的码片,取每个码片的前 5 个采样点叠加为 1 个点,然后将 5 个码片剩下的 5 个采样点叠加成一个点,这样就将 30 个采样点的 5 个 6 点采样变为 6 个 5 点采样。最后,两个最大游程处就各多出一个叠加后的采样点。以北斗 1 号 GEO 卫星最大游程处的采样过程为例,采样示意图如图 6 所示。

(4)除了步骤(3)中两个最大游程处的 10 个采样点数是 6 的码片外,将其余 2 036 个码片上的采样点各自叠加为 1 个点。

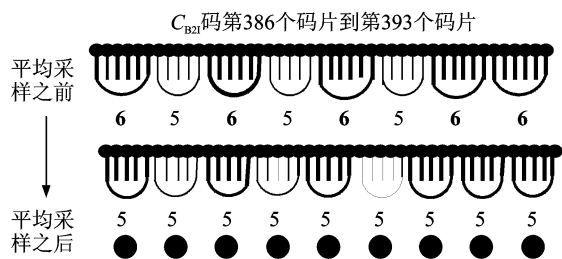


图 6 最大游程处平均采样示意图

Fig. 6 Diagram of averaging sampling at maximum run-length

图 6 中, \uparrow 表示 1 个采样点, 5 和 6 代表码片上采样点的个数, \bullet 表示平均采样后的 1 个采样点。

经过上述步骤后,11 428 个采样点直接平均采样至 2 048 个点,在最大游程处进行平均采样时虽然跨越了 C_{B21} 码片,但是由于同一个游程内的码片符号相同,所以叠加的采样点并没有跨越符号位,即不存在能量损失。平均采样前后 C_{B21} 码的自相关性如图 7 所示。由图 7 可以看出,平均采样后的 C_{B21} 码和平均采样前相比依然具有良好的自相关性,为接下来利用平均采样后的数据进行捕获奠定了基础。

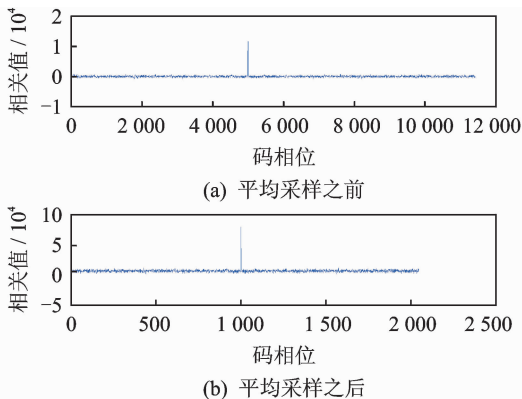


图 7 平均采样前后 C_{B21} 码的自相关特性图

Fig. 7 Auto-correlation of C_{B21} code before and after averaging sampling

通过上面介绍可以知道,平均采样就是将连续的 5 个或 6 个采样点叠加为 1 个点。但是,11 428 个采样点的第一个点不一定是某个码片的第一个采样点,为了解决以上问题,将输入信号的前 6 个连续的数据点分别作为输入信号第一个平均采样点的首个数据点,这样就形成了 6 个长度为 2 048 的序列,这其中必定有一个序列和本地码的平均采样结果最为接近,利用此序列进行捕获即可得到最大的捕获相关峰值。

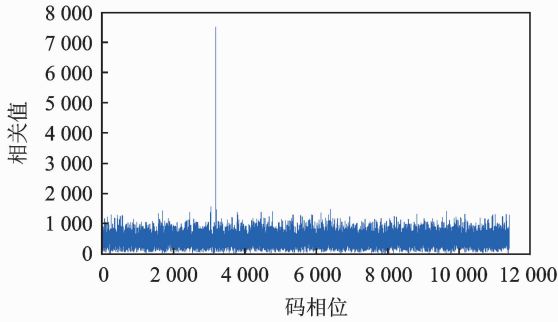
4 仿真结果及分析

本文利用 1.2 节中基于 MATLAB 软件仿真模拟的北斗 1 号 GEO 卫星的信号源对本文提出的算法进行仿真验证。信号源中 C_{B21} 码初始码相位偏移设置为 575 个码片。多普勒频率的搜索范围为 $-10 \sim +10$ kHz,搜索步长为 1 kHz,所以捕获结果中有 21 个多普勒频率分量,利用传统的并行码相位捕获算法的捕获结果如图 8 所示。

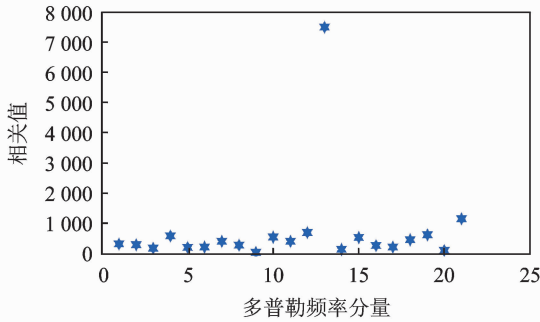
基于平均相关的 B2 信号快速捕获算法的捕获原理图如图 9 所示^[17]。

对输入的北斗 1 号 GEO 卫星仿真信号进行 6 种平均采样形成 6 个采样序列,然后对这 6 个采样序列分别进行捕获,捕获结果如图 10 所示。其中图 10(a)为 C_{B21} 码相位的捕获结果,为了观测方便,图 10(b)为对图 10(a)为相关峰值附近点的放大图,图 10(c)表示的是多普勒频率的捕获结果。

由图 10 可知,对输入信号进行平均采样形成的序列 1~5 进行捕获,捕获的码相位相关峰值位于第 576 个 FFT 计算点上,如果折算到 2 046 个点的码相位上,捕获到的码相位偏移为 $\text{round}(576 \times \frac{2\ 046}{2\ 048}) = 575$,和预期的码相位偏移误差相同;捕获



(a) 码相位捕获



(b) 多普勒频率捕获

图 8 基于传统并行码相位捕获算法的捕获结果

Fig. 8 Acquisition results based on traditional parallel code phase acquisition algorithm

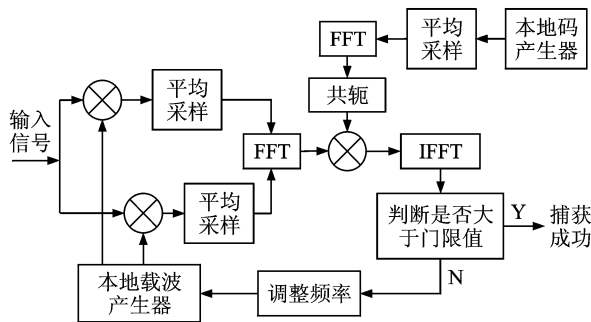
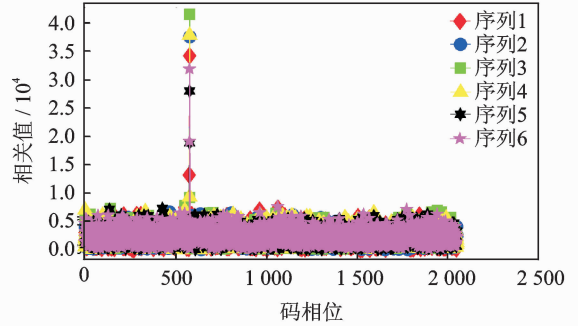


图 9 基于平均相关的快速捕获算法原理

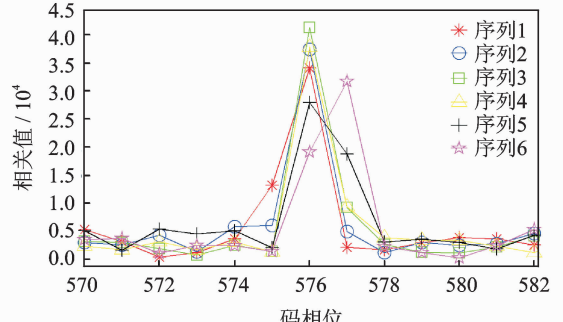
Fig. 9 Principle of fast acquisition algorithm based on averaging correlation

的载波多普勒频率位于第 13 个频率分量上,即多普勒频率为 $-10 \text{ kHz} + (13-1) \times 1 \text{ kHz} = 2 \text{ kHz}$,和预设的多普勒频率相同,即捕获成功。其中对输入序列 3 的捕获所产生的捕获相关峰值最大,捕获性能最好,所以序列 3 被认为是对输入信号进行平均采样后损失能量最小即是用于捕获最理想的序列。

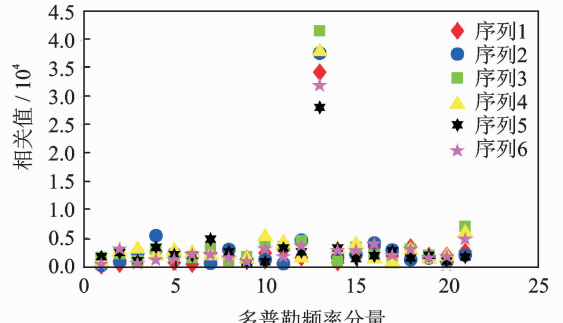
如前所述,这种平均采样算法的最大的优点就是和传统捕获算法相比不会引起信号的能量损耗,本文利用捕获结果中最大峰值和次大峰值的比值 (Peak-to-peak ratio, PPR) 来表示信号相对于噪



(a) C_{B21} 码相位捕获结果



(b) 图 10(a) 相关峰值附近点的放大图



(c) 多普勒频率捕获结果

图 10 基于平均相关算法的捕获结果

Fig. 10 Acquisition results based on averaging correlation algorithm

声的强度,同时也可以表明是否可以正确找到可靠的码相位,即是否捕获成功^[12]。为了对平均相关捕获算法的性能进行验证,本文取 200 ms 连续的输入信号,分别利用传统的捕获算法和平均相关捕获算法 (采用序列 3) 进行 200 次捕获,两种算法 200 次捕获结果的 PPR 值如图 11 所示。由图 11 可以看出,总体来说,平均相关捕获算法的 PPR 值并不低于传统捕获算法的 PPR 值,即两种算法对同一载噪比的信号的捕获能力基本相同,因此两者的捕获灵敏度相差无几。

两者捕获算法的计算量如表 2 所示。其中,第 1 步表示对输入信号进行 FFT 运算,第 2 步是指对本地 C_{B21} 码进行 FFT 运算,第 3 步表示利用 IF-

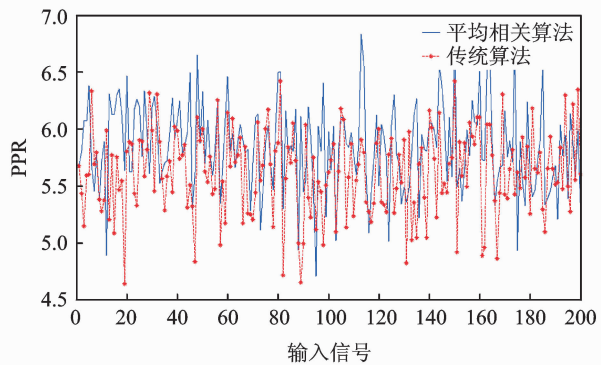


图 11 两种捕获算法的 PPR 对比

Fig. 11 PPR comparison between two algorithms

FT 运算求相关结果。对于平均相关捕获算法,需要对输入信号的 6 个平均采样序列分别作 FFT 运算,然后只需要对本地 C_{B21} 码进行一次平均采样及 FFT 处理。由表 2 的总计算量可以看出,平均相关捕获算法和传统的并行码相位捕获算法相比,一方面乘法的计算量有明显减少,加法的计算量也略有减少;另一方面在硬件实现上,很显然 2 048 点 FFT 的实现难度和成本都远远低于 11 428 点 FFT 的实现。

表 2 两种捕获算法的计算量对比

Tab. 2 Comparison of amount of calculation between two acquisition algorithms

步骤	操作	传统捕获算法	平均相关捕获算法
1	乘	$5\ 714 \times \log_2 11\ 428$	$6 \times 1\ 024 \times \log_2 2\ 048$
	加	$11\ 428 \times \log_2 11\ 428$	$6 \times (2\ 048 \times \log_2 2\ 048 + 9\ 380)$
2	乘	$5\ 714 \times \log_2 11\ 428$	$1\ 024 \times \log_2 2\ 048$
	加	$11\ 428 \times \log_2 11\ 428$	$2\ 048 \times \log_2 2\ 048 + 9\ 380$
3	乘	$5\ 714 \times \log_2 11\ 428 + 11\ 428$	$6 \times (1\ 024 \times \log_2 2\ 048 + 2\ 048)$
	加	$11\ 428 \times \log_2 11\ 428$	$6 \times (2\ 048 \times \log_2 2\ 048 + 9\ 380)$
总计	乘	242 507	158 720
	算量加	462 160	414 840

5 结束语

本文根据 2013 年 12 月份公布的北斗二代 B2 频点信号的结构特点,针对传统的并行码相位捕获算法捕获速度较慢,无法满足软件接收机对捕获实时性要求的问题,提出了一种基于改进的平均相关算法的北斗 B2 信号快速捕获方法。仿真结果证明,该算法在保证捕获灵敏度基本不变的前提下,由于平均采样将采样点由 11 428 降至 2 048,使得

该算法的计算量相比传统的捕获算法节省了近一半,并且由于 2 048 的点数少且又是 2 的整数次幂,所以显著降低了用硬件实现 FFT 算法的难度和成本,有助于实时软件接收机的实现。

参考文献:

[1] 谭述森. 北斗卫星导航系统的发展与思考[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 391-396.
Tan Shusen. Development and thinking about Beidou satellite navigation system[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(2): 391-396.

[2] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公共服务信号[M]. 2.0 版. 北京: 中国标准出版社, 2013.
China Satellite Navigation Office. Beidou navigation satellite signal in space interface control document open service signal[M]. Version 2.0. Beijing: China Standardization, 2013.

[3] 朱建良, 王兴全, 薄煜明, 等. 提高北斗 BOC 信号捕获精度的伪码相位估计法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(1): 79-83.
Zhu Jianliang, Wang Xingquan, Bo Yuming, et al. Pseudo code phase estimation method for improving BOC signal acquisition accuracy of Beidou[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(1): 79-83.

[4] 冯瑞. 北斗二代接收机基带信号处理算法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
Feng Rui. The processing arithmetic research of baseband signal in compass receiver [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.

[5] 费攀, 宋鹏, 齐建中. 北斗二代 B1 频点导航接收机的研究与实现[C]// 第三届中国卫星导航年会—S07 北斗/GNSS 用户终端技术. 广州: [s. n.], 2012.
Fei Peng, Song Peng, Qi Jianzhong. The COMPASS B1 frequency navigation receiver research and implementation[C]// The 3rd China satellite Navigation Conference-S07 COMPASS/GNSS User Terminal Technology. Guangzhou: [s. n.], 2012.

[6] Soudan M, Geiger B C. On the averaging correlation for satellite acquisition in software defined radio receivers [C]// Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland: [s. n.], 2010: 3284-3289.

[7] 刘天旻, 茅旭初. 北斗二代系统 B1 频段中频信号的生成方法[J]. 计算机仿真, 2013, 30(9): 70-73.
Liu Tianwen, Mao Xuchu. Method of BD2 B1 signal generating[J]. Computer Simulation, 2013, 30(9):

- 70-73.
- [8] 徐昭,李荣冰,谢非,等. 北斗 B1 频点中频信号仿真系统设计[J]. 系统仿真技术,2013,9(3):229-235.
Xu Zhao, Li Rongbing, Xie Fei, et al. Design of IF signal simulation for Beidou B1 signal[J]. System Simulation Technology, 2013,9(3):229-235.
- [9] Zeng Qingxi, Tang Linlin, Wang Qing, et al. Weak GPS L1 signal acquisition based on BPDC[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 31(3):331-337.
- [10] Tsui J B Y. Fundamentals of global positioning system receivers: A software approach[M]. USA: John Wiley & Sons, 2000.
- [11] 曾庆喜,唐琳琳,王庆,等. 基于分段 FFT 的 GPS L1/L2C 信号快速捕获算法[J]. 中国惯性技术学报, 2013,21(5):640-645.
Zeng Qingxi, Tang Linlin, Wang Qing, et al. Algorithm of GPS L1/L2C fast acquisition based on segmented FFT[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013,21(5):640-645.
- [12] Starzyk J A, Zhu Z. Averaging correlation for C/A code acquisition and tracking in frequency domain [C]//Proceedings of the 44th IEEE 2001 Midwest Symposium on Circuits And systems. Seoul: [s. n.], 2001: 905-908.
- [13] Alaqeeli A, Starzyk J, Graas F V. Real-time and acquisition and tracking for GPS receivers[C]// Proceedings of The 2003 IEEE International Symposium On Circuits And systems. Thailand: [s. n.], 2003: 500-503.
- [14] 宋茂忠,刘圣忠. FFT 在 GPS 信号捕获中的应用[J]. 计算机技术与应用进展,2008,23(2):669-673.
Song Maozhong, Liu Shengzhong. FFT application in GPS acquisition[J]. Computer Technology and Application Development, 2008, 23(2): 669-673.
- [15] 曾庆化,刘建业,彭文明,等. 我国卫星导航系统相关技术发展分析[J]. 航天控制,2006,24(4):91-96.
Zeng Qinghua, Liu Jianye, Peng Wenming, et al. Interrelated techniques developments and analysis of Chinese satellite navigation system [J]. Aerospace Control, 2006,24(4):91-96.
- [16] 张炳琪,刘峰,陈禾,等. 北斗 B1 频点公开服务信号调制方式研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011,41(5):569-574.
Zhang Bingqi, Liu Feng, Chen He, et al. Research on compass B1 open service signal modulation[J]. Scientia Sinica: Phys, Mech & Astron, 2011, 41(5): 569-574.
- [17] Fantino M, Pini M, Mulassano P. Signal compression for an efficient and simplified GNSS signal parallel acquisition[C]// Proceeding of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Savannah: [s. n.], 2008:159-166.